干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

汉江上游郧县段北宋时期古洪水事件研究

王光朋， 查小春， 黄春长， 庞奖励， 张国芳
（陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710119）

摘 要：古洪水水文学研究是全球变化研究领域的前沿科学。通过对近年来古洪水成果的整理发现，汉江上游郧县段4个沉积剖面——晏家棚（YJP）、尚家河（SJH）、归仙河口（GXHK）和弥陀寺（MTS）均记录有北宋时期（960～1 127 CE）的古洪水事件。通过对4个沉积剖面所在河段的研究，根据实测的河槽断面数据、水文参数以及设计推求的古洪水流量过程，采用HEC－RAS模型模拟了北宋古洪水的演进过程及古洪水水面线。此外，采用2010年"7·18"洪水进行了模型的可靠性验证。结果表明：与调查的古洪水水位相比，4个沉积剖面处的模拟水位误差介于－0.31%～0.34 %之间，说明这4个沉积剖面极有可能记录一次古洪水事件；洪峰在研究河段内演进历时约1.15 h且削减不足1%，这符合研究河段的洪水传播特性。该研究对于认识汉江上游特大洪水的演进规律具有重要的科学意义，为流域的洪水设计、洪水预测及防洪减灾提供一定的基础数据与科学支撑。

关 键 词： 古洪水研究；北宋时期；HEC-RAS模型；防洪减灾；汉江上游
文章编号： 1000－6060（2020）04－0967－10（0967～0976）

洪水灾害是当今世界上分布最广且损失最为严重的自然灾害之一[1－2]。21世纪以来，随着全球气候变化和区域可持续发展科学研究的深入开展，气候变化对极端水文过程的影响已受到国际气象、水文和灾害风险等领域众多学者的广泛关注。联合国教科文组织国际水文计划（UNESCO-IHP）第二阶段的研究也将极端水文灾害的影响作为研究重点。因此，准确地模拟河道特大洪水的传播时间及其运动规律，对于充分认识流域的洪水风险以及防洪减灾对策的合理制定具有重要的现实意义。

汉江上游位于我国南北方气候的过渡地带，其水文变化过程对全球气候变化的响应尤为显著。近年来，汉江上游频繁发生的洪水灾害不仅严重影响了流域社会经济的可持续发展，同时也制约了"南水北调"中线工程的顺利实施[3]。因此，准确的掌握洪水资料对于流域水资源的综合开发与治理具有重要的科学意义与实践价值。然而，由于我国水文观测的时间尺度相对较短，要解决"充分认识洪水的发生规律、建立合理的流量–频率关系"这一科学问题，需要从古洪水和历史洪水中去寻求答案。

古洪水水文学研究可以获得实测洪水资料中尚未反映出的洪水特征及变化规律，从而为探讨流域洪灾的成因以及防灾减灾提供科学的依据。因此，古洪水研究已成为全球气候变化研究领域的热点课题。美国以及欧洲等西方国家已经进行了大量的古洪水案例研究并取得了显著地成果[4－6]。自20世纪80年代以来，我国学者对长江和黄河的重要河段开展了全新世古洪水的调查研究，其研究成果已应用于重大水利工程的建设[7－9]。近年来，黄春长教授在汉江上游开展了大量的古洪水调查研究，挖掘和重建了地质沉积记录中超长时间尺度的古洪水事件[10－13]。本文通过对近年来研究成果的整理，发现汉江上游郧县段4个沉积剖面——晏家棚（YJP）、尚家河（SJH）、归仙河口（GXHK）、和弥陀寺（MTS）顶层古洪滞流沉积物（Slack-Water Deposits，SWD）均记录有1 000～900 a BP的北宋

收稿日期： 2019－07－09； **修订日期：** 2020－01－12
基金项目： 自然科学基金重点项目（41030637）；国家社会科学基金项目（14BZS070）；国家自然科学基金重点项目（41271108）资助
作者简介： 王光朋（1991－），男，硕士研究生，研究方向环境变化与自然灾害. E-mail：201831051091@mail.bnu.edu.cn
通讯作者： 查小春（1972－），男，教授，博士生导师，研究方向环境变化与自然灾害. E-mail：zhaxch@snnu.edu.cn

(960~1 127 CE)古洪水事件。靳俊芳等[14]、刘嘉慧[15]根据地层对比并结合历史洪水的考证研究认为:4个沉积剖面顶层古洪水SWD可能记录北宋太平兴国七年(982 CE)六月的一次特大洪水事件。本文运用HEC-RAS模型,从洪水水面线计算与演进模拟的角度对4个沉积剖面记录的北宋古洪水事件进行了深入的研究,计算得到了古洪水水面线、淹没水深与流速。该研究有助于充分掌握汉江上游特大洪水的演进规律,同时为流域的防洪减灾及洪灾风险评价提供了基础数据。

1 研究区概况及暴雨洪水特性分析

汉江发源于秦岭南麓,于武汉市注入长江,全长1 577 km。丹江口以上为汉江上游。本文研究河段为汉江上游郧县段(图1)。通过实地调查,河段内无大型支流汇入,河流切割古生代变质岩地层,形成了基岩峡谷河槽,河道平均宽为300~400 m。汉江上游地处北亚热带季风性湿润气候区,多年平均降水量为700~1 000 mm[9]。研究河段上游设有白河水文站,其上游河长709 km,控制流域面积为59 115 km^2,实测最大洪峰流量为31 000 $m^3 \cdot s^{-1}$(1983年8月),历史调查最大洪水为34 800 $m^3 \cdot s^{-1}$(1583 CE)[16]。

由于汉江上游特殊的地理位置、地形及大气环流条件,自古以来流域内暴雨洪灾频繁发生[17-18]。

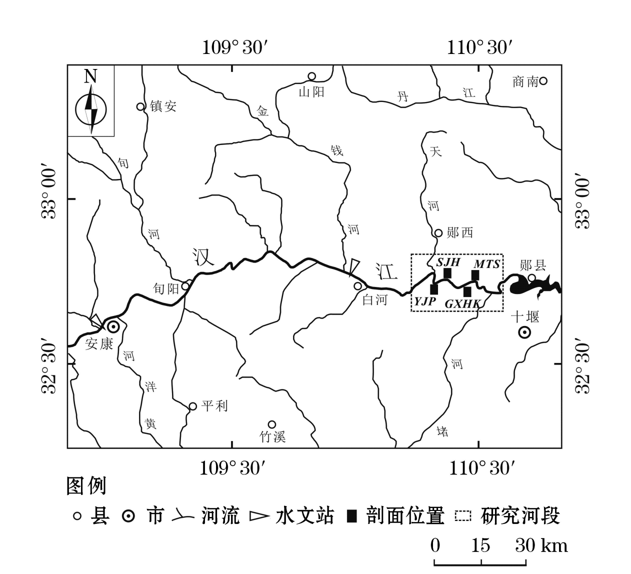


图1 研究河段水系分布及剖面位置

Fig. 1 Water system distribution and profile location of the study river section

李庆宝[18-19]、何长春[20]、王学琪[21]、张楷[22]、党红梅等[23]对汉江上游暴雨洪水特性及其发生规律进行了详细的研究。通过对汉江上游地区的天气形势及大气环流的研究分析可知,研究河段的暴雨洪水主要为过境洪水,其洪水产流区主要位于安康上游的秦岭和米仓山区域。如明万历十一年(1583 CE)六月的特大洪水事件,其暴雨中心位于安康上游的西乡、石泉、紫阳、岚皋等地[24]。1983年8月特大洪水事件的两个暴雨中心分别为南郑县小坝一带以及紫阳县瓦房店和镇巴县鱼渡坝一带。然而,两个暴雨中心均位于安康上游地区;其洪量分析表明,石泉以上流域洪量占了58%,石泉–安康段区间洪量占了42%[22]。

2 汉江上游北宋时期古洪水的沉积记录

区别于近现代水文器测记录的洪水,古洪水是指全新世以来未经直接观察和记录的洪水事件[25]。目前古洪水研究通常采用两种方法:文献资料法与地质记录法。虽然我国历史文献浩如烟海,但由于朝代更迭和战乱频仍,现存历史文献中洪灾记录不仅在时间尺度上缺乏连续性,而且大部分记录较为简略,如东汉建安二年(197 CE)"秋九月,汉水溢,流人民[26]",这就给历史洪灾研究的定量分析与应用带来了一定的困难。然而,沉积记录中的古洪水SWD,是在洪峰滞流状态下由悬移质泥沙沉积而成,因而能准确地记录古洪水行洪时的水动力条件和沉积环境,是采用地质记录法进行古洪水水文学研究的主要信息载体。通过对沉积剖面进行地貌地层学、古洪水水文学、年代学、考古学及对样品的理化性质分析,可以鉴定其是否为典型的古洪水SWD,进而可以通过水力学模型将古洪水的洪峰水位转换为洪峰流量,从而为流域的洪水设计和防洪减灾提供基础数据。

通过对汉江上游郧县段的实地考察,4个沉积剖面(YJP、SJH、GXHK、MTS)地层中均记录有北宋古洪水事件(图2)。YJP剖面位于郧县段汉江左岸晏家棚村附近一级阶的前沿,剖面内有3层古洪水SWD,其中顶层古洪水SWD为浅棕黄色细沙,呈"楔形"伸入到地层中,并向岸边方向尖灭。SJH剖面位于汉江左岸尚家河村附近,地层未发现有人为扰动,层次较完整,在剖面深70~90 cm处有古洪水

SWD沉积层。GXHK剖面位于汉江一级阶地前沿，高出汉江平水位约20 m，顶部为现代耕作层，古洪水SWD沉积层清晰的夹于黄土和表土层之间。MTS剖面位于汉江左岸一级阶地上，在剖面深30～40 cm处，浊棕色的古洪水SWD呈楔形伸入地层，厚度约10 cm。

对4个沉积剖面进行了地层对比分析发现，4个沉积剖面顶层古洪水SWD有如下特点：(1) OSL年代测定均为1 000～900 a BP的北宋时期（960～1127 CE)。(2) 4个沉积剖面中，顶层古洪水SWD因其沉积高度较高，均记录特大古洪水事件。(3) 4个沉积剖面集中分布于汉江上游郧县河段长约19 km的基岩峡谷河道中。(4) 顶层古洪水SWD在沉积剖面中的分布层序基本相同（图2)。这表明汉江上游郧县段4个沉积剖面中最上部的古洪水SWD可能记录一次特大洪水事件；据前人相关研究，可能记录北宋太平兴国七年（982 CE）六月的一次特大洪水事件[14-15]。

3 HEC-RAS模型的构建

3.1 HEC-RAS模型简介

HEC-RAS模型是由美国陆军工程兵团(USACE）开发并主要用于河流水动力分析的水力学软件。其最新版本（V5.03）可以进行二维洪水的演进模拟研究[27]。HEC-RAS模型因其具有良好的物理学成因基础，在国外已广泛应用于古洪水水面线的计算和古洪水的演进模拟研究[6,28]，我国学者也大量运用该模型对现代洪水进行了演进模拟研究[29-30]。本文主要运用了该模型的一维恒定流（Steady flow）和非恒定流模块（Unsteady flow）模拟了北宋古洪水的演进过程及水面线。模型的基本原理是基于能量方程（1)、连续方程（2）和动量方程（3)，其表达式如下：

$$Y_1+Z_1+\frac{\alpha_1 v_2^2}{2g}+h_e=Y_2+Z_2+\frac{\alpha_1 v_2^2}{2g} \tag{1}$$

$$\partial\rho/\partial t+\partial(\rho u_i)/\partial x_i=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=f_i-\frac{1}{P}\frac{\partial P}{\partial x_i}+\lambda\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j\partial x_i} \tag{3}$$

式中：Y、Z、v分别为相邻两断面的水深(m)、河底高程(m)、平均流速（$m\cdot s^{-1}$)；α为断面的动能修正系数；g为重力加速度（$m\cdot s^{-2}$)；h_e为水头损失(m)；ρ为流体密度($kg\cdot m^{-3}$)；t为时间(s)；u为流速（$m\cdot s^{-1}$)；f_i为质量力($m\cdot s^{-2}$)；P为压力($N\cdot m^{-2}$)；λ为流体运动黏滞系数($N\cdot s\cdot m^{-2}$)；x为断面之间的距离(m)。

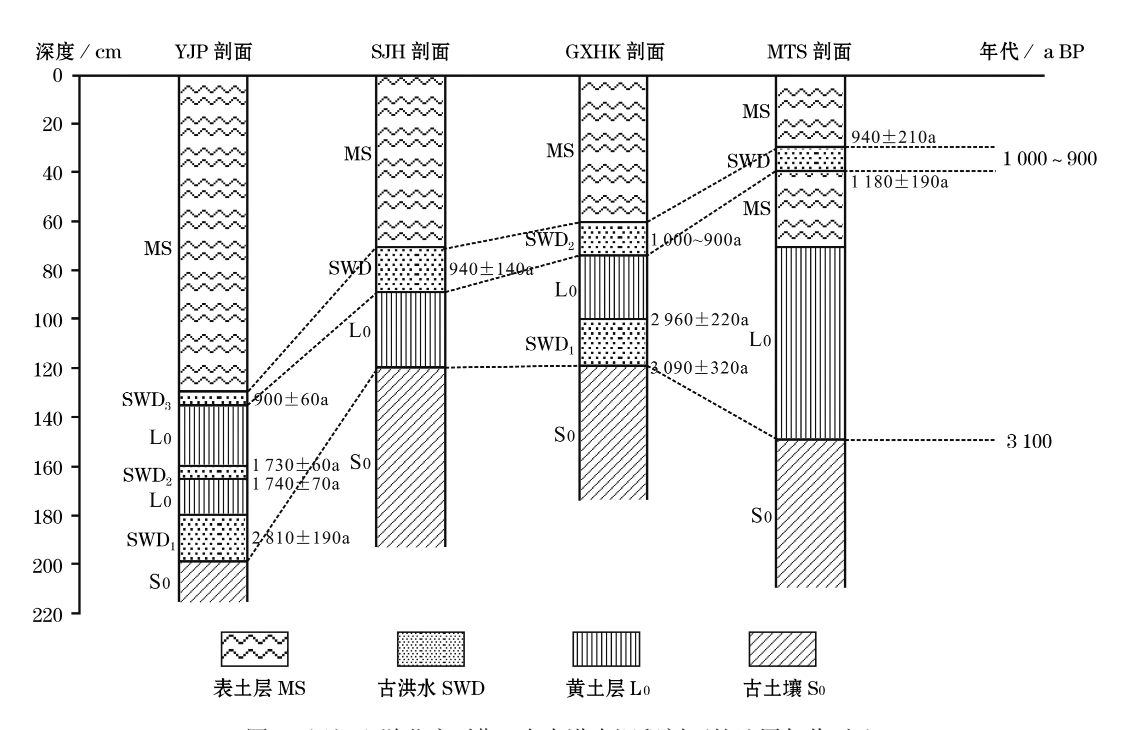


图2 汉江上游北宋时期4个古洪水沉积剖面的地层年代对比

Fig. 2 Stratigraphic age comparison of four palaeoflood sediments in the upper reaches of Hanjiang River during the Northern Song Dynasty

3.2 模型系统的构建

河槽横断面数据和必要的水力参数是HEC-RAS模型模拟计算的前提和基础。

3.2.1 *河道横断面数据* 通过对汉江上游郧县段的实地调查,该段下伏基岩为古生代变质岩系[31]。河谷受基岩控制,纵向变化较小;两岸受低山丘陵的约束,横向摆动亦不大,且研究河段地壳较为稳定。因此,研究河段的河槽形态在全新世以来总体变化较小,适合进行古洪水水文学研究。为进一步确保古洪水演进模拟过程中地形数据的可靠性,在野外考察中使用高精度全站仪和GPS等设备,在研究河段内较为均匀的实测了40个河流大断面数据。此外,在ArcGIS中根据1:10 000实测河流地形图内插了50个河流断面。河流断面的沿程分布情况如图3所示。

3.2.2 *糙率系数与收缩扩张系数* 河道糙率系数是洪水模拟研究的重要灵敏度参数。研究河段为基岩峡谷段,具有"山大谷小"的特点(图3)。两岸低山高出水面约100~200 m,谷宽约400~600 m,水面宽在200 m以上。河谷坡脚在30°~40°之间,低漫滩长有杂草,两岸阶坡长有灌木和乔木。根据实地考察记录并参照天然河道曼宁糙率系数的取值标准[32],确定主槽曼宁糙率系数$n=0.030$;陡岸由于坡度较大、植被较缓岸少,取$n=0.050$;缓岸取$n=0.055$。此外,根据研究河段内河槽断面形态的沿程变化及水流流态,设置河道的收缩和扩张系数分别为0.1、0.3,流态设置为缓流[27]。

3.2.3 *边界条件与初始条件* 由于造成特大洪水的暴雨主要来源于安康及其以上地区,且研究河段内无大型支流汇入。因此,在北宋古洪水事件的模拟研究中不考虑区间入流情况。设置上游入流边界为研究河段上游YJP剖面附近——断面1位置,输入根据实测历史洪水数据设计推求的特大洪水流量过程线;下游出流边界为MTS沉积剖面附近——断面90位置,输入根据实测断面数据推算的水位-流量关系曲线。此外,为了保证模型起算模拟的平稳运行,将模型的初始条件设置为研究河段多年平均流量。

4 结果分析与模型验证

4.1 汉江上游北宋时期古洪水水面线计算

由于实测洪水记录中特大稀遇洪水事件在短

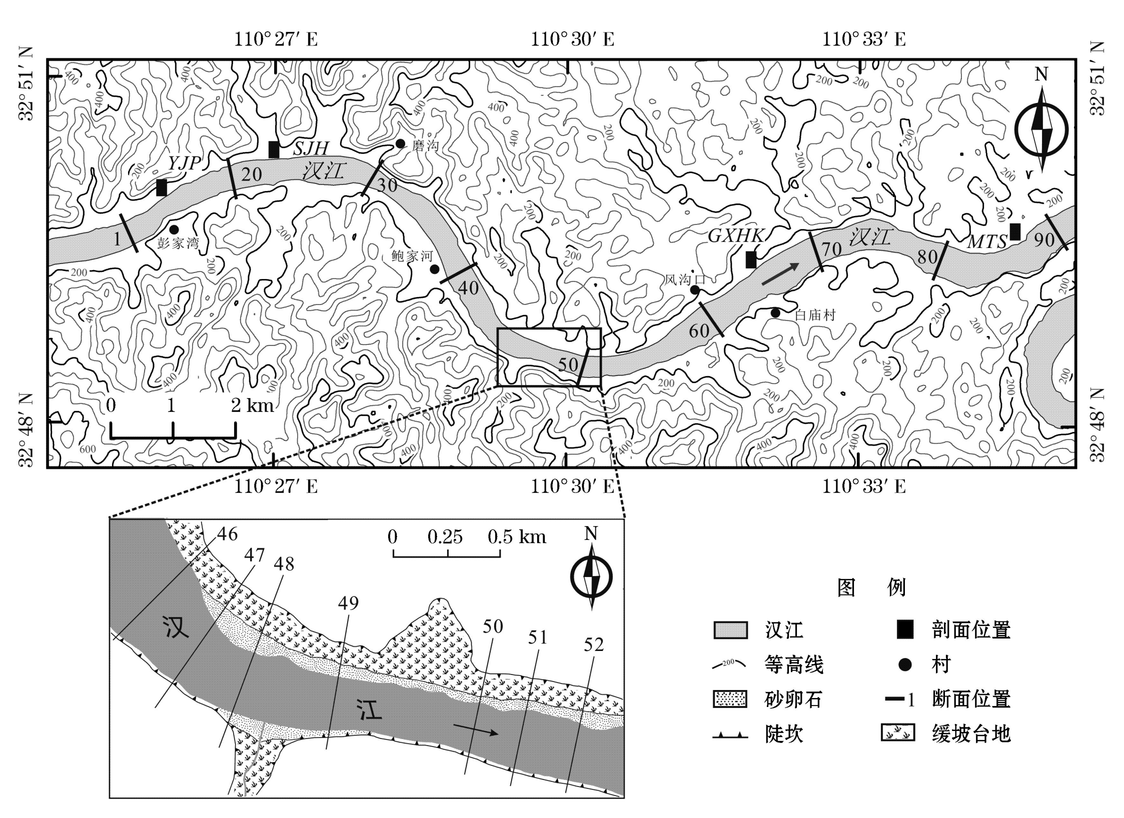


图3 研究河段河槽断面数据的沿程分布

Fig. 3 Cross sections distribution along the study reach

期内发生的概率较小,因此,其洪水水面线的计算和洪水运动规律的研究也较少涉及。本文通过实地考察及地层对比研究,确定了4个沉积剖面中记录的北宋古洪水事件。根据实测的地形数据及水文参数,基于HEC-RAS模型的恒定流模块(Steady flow)反演了古洪水的水面线(图4),并可视化显示了古洪水的水深和流速(图5)。通过HEC-RAS模型的多次试算与误差校核,当模拟洪峰水位与实地调查的古洪水洪峰水位达到最佳吻合时,洪峰流量的模拟值为57 500 $m^3 \cdot s^{-1}$[33-34];该值介于4个沉积剖面洪峰流量的重建值之间[10-13]。由表1和图4可知,4个沉积剖面处的模拟水位分别为:YJP剖面,178.10 m;SJH剖面,176.86 m;GXHK剖面,170.55 m;MTS剖面,169.18 m。与实地调查的古洪水洪峰水位相对比,模拟误差介于-0.31%~0.34%之间。

表1 4个沉积剖面处古洪水水位的模拟误差

Tab. 1 Simulation error of palaeoflood water level at 4 sedimentary sections

剖面位置	调查洪峰水位 / m*	模拟洪峰水位 / m	水位误差 / m	相对误差 / %
晏家棚(YJP)	177.5	178.10	+0.60	+0.34
尚家河(SJH)	177.1	176.86	-0.24	-0.14
归仙河口(GXHK)	170.2	170.55	+0.35	+0.21
弥陀寺(MTS)	169.7	169.18	-0.52	-0.31

注:* 洪峰水位采用"古洪水SWD厚度与含沙量法"确定

基于相同的地形数据及水文参数,采用白河水文站2010年"7·18"洪水的实测流量过程线对HEC-RAS模型进行了可靠性验证。由图4可知,2010年洪水的洪峰模拟水位与研究河段内实地调查的9处洪痕所指示的洪峰水位较好吻合,其模拟水位误差介于0.12~0.71 m之间,相对误差在-0.18%~0.32%之间。此外,2010年"7·18"洪水水面线除在研究河段下游MST剖面附近略有壅水现象之外,其水面线与北宋古洪水水面线基本平行。经实地考察得知,MTS剖面处的壅水现象主要受丹江口大坝的影响。丹江口大坝的修建及加高在一定程度上减弱了其上游河段(MTS剖面附近河段)的水动力环境,在抬高了河流水位的同时沉积了部分泥沙,以致研究河段下游出现壅水现象。经验证,本文基于HEC-RAS模型模拟的郧县段北宋古洪水水面线是科学合理的;所选取的河槽断面数据和水文参数较为可靠。

4.2 汉江上游北宋时期古洪水事件的演进模拟研究

准确的掌握河道洪水的运动规律,对于流域内的洪水预报、防洪减灾以及洪灾风险评价具有重要的实践意义。在国外,古洪水水文学研究已广泛应用于洪灾风险评估和洪水设计[35-36]。洪灾风险评估是对未来可能发生的同等量级的洪水事件进行模

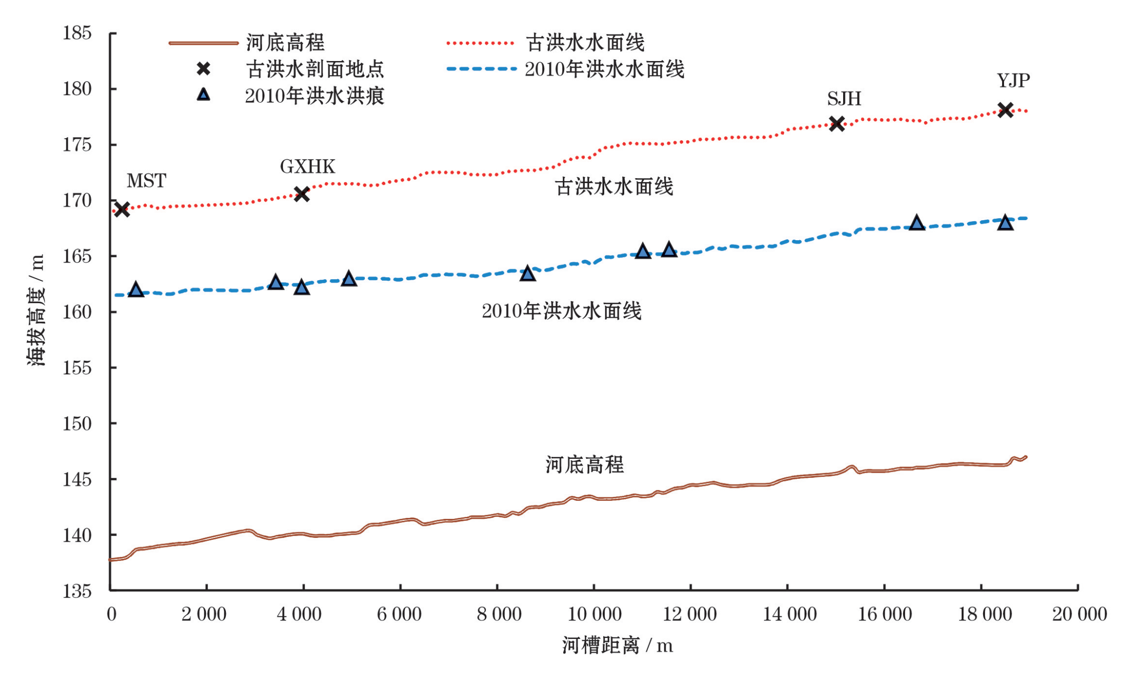


图4 基于HEC-RAS模型的研究河段古洪水水面线模拟结果

Fig. 4 Simulation results of palaeoflood water surface profile of study reach based on the HEC-RAS model

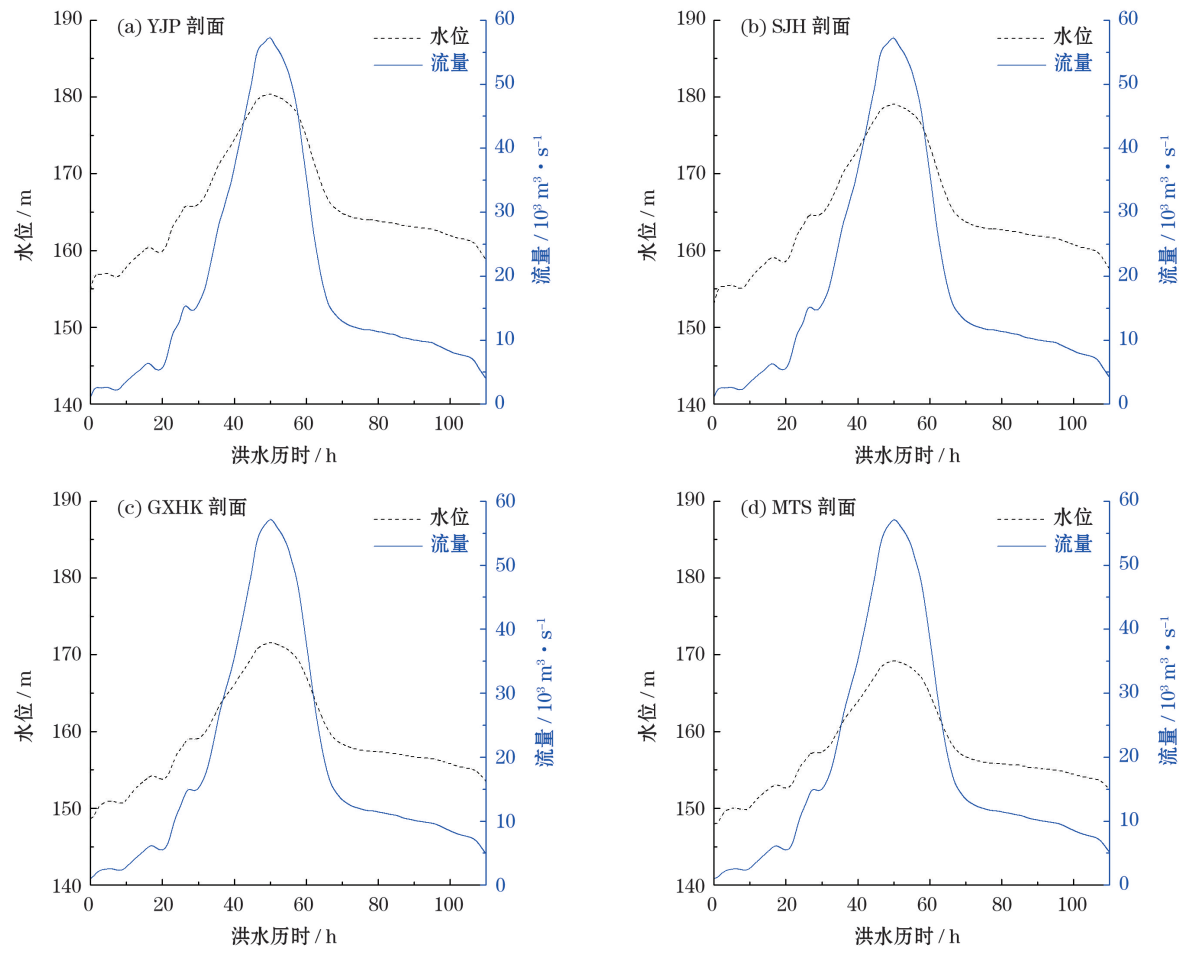


图5　基于HEC-RAS模型模拟的4个剖面处的古洪水水位过程线与流量过程线

Fig. 5　Simulated water level hydrograph and discharge hydrograph of four profiles based on the HEC-RAS model

拟并预报，以此作为制定洪灾对策和减少洪灾损失的重要依据。BENITO等[35-36]在欧洲委员会基金项目（SPHERE）的资助下研究了一套基于水力学模型并联合古洪水和历史洪水数据的洪灾风险评价方法，可视化的淹没范围及淹没水深为流域特大洪水的洪灾风险预警提供了基础数据。美国陆军工程兵团（USACE）[37]也指出在做出水文、水利决定时应适当应用古洪水信息，而且可以采用一维/二维水力模型（HEC-RAS、MIKE系列模型等）对古洪水进行水位/流量推算，或根据实测洪水过程线设计洪水过程，对古洪水进行演进模拟研究，以便将模拟结果应用于洪水预测和洪水风险评价中。ALHO等[28]采用二维水力模型对米苏拉（Missoula）特大洪水进行了演进模拟研究，并分析了在3种假设流量过程模式下的淹没水深及流速分布情景。这些研究都为古洪水的演进模拟研究提供了科学依据。

根据前人对研究河段暴雨洪水特性的分析，本文采用同倍比法按峰值放大了白河水文站典型实测洪水过程线（2010年“7·18”洪水），推求得到了北宋古洪水的流量过程。然后基于HEC-RAS模型的非恒定流模块（Unsteady flow）模拟了古洪水的演进过程，并得到了4个沉积剖面处的流量过程线和水位过程线（图5）；此外，可视化显示了北宋古洪水的淹没范围、水深及流速分布（图6）。

经模拟计算可知，古洪水的洪峰在研究河段内演进历时约为1.15 h。这为研究河段未来可能发生同等量级的特大洪水事件提供了准确的洪水预报数据。经查阅相关文献[38-39]，2010年“7·18”洪水（$Q = 21\ 400\ m^3 \cdot s^{-1}$）洪峰在白河—丹江口河段的演进历时约为12 h，据此估算在YJP—MTS河段其洪峰演进历时约为1.5 h。此外，经实地走访水文监测站工作人员及研究河段两岸村民得知，1983年特大洪水（$Q = 31\ 000\ m^3 \cdot s^{-1}$）在研究河段内的洪峰传播时间约为1.3 h。因此，本文基于HEC-RAS模型模拟的北宋古洪水的演进过程是合理的。

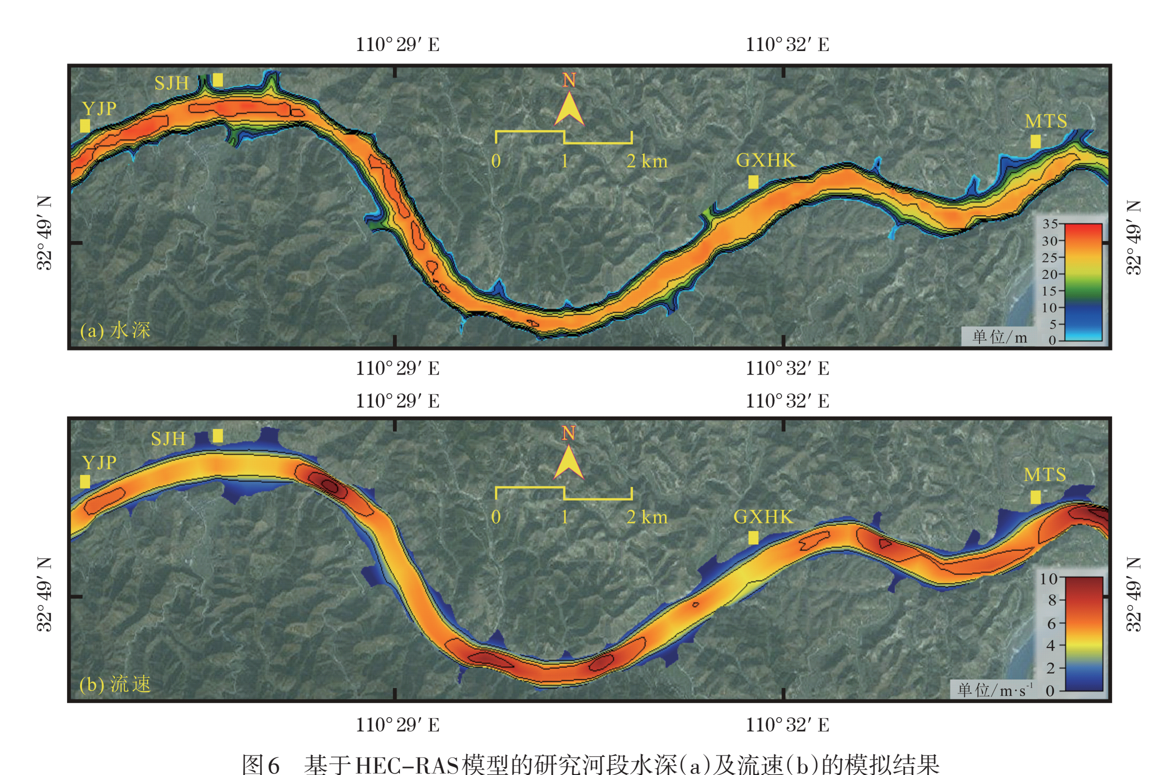


图6　基于HEC-RAS模型的研究河段水深(a)及流速(b)的模拟结果

Fig. 6　Simulated water depth (a) and velocity distribution (b) of the study reach based on the HEC-RAS model

通过对比YJP和MTS剖面的流量过程线及水位过程线可知(图5a、5d),研究河段河道对洪水的调蓄作用十分微弱。在洪水的演进过程中,洪峰在长约19 km的河道上仅削减了不足1%,这符合研究河段的洪水传播特性[17-23]。据水深可视化模拟结果(图6a),研究河段内上游水深大于下游水深。YJP和MTS剖面附近河段的古洪水水深分别介于30~32 m和25~30 m。这一方面是受河道比降的影响,使得上游部分河段(如SJH剖面附近,4~8 $m\cdot s^{-1}$)的流速略低于下游河段(6~10 $m\cdot s^{-1}$)(图6b);另一方面则由于河段下游河道相对展宽,从而使得水深减小。

通过对北宋古洪水的演进模拟研究可知,研究河段洪水淹没的高风险区主要分布在汉江两岸有限的区域之内。由图6b可知,在特大洪水沿河道向下游演进的过程中,除在支流沟口发生少量跑滩现象之外,在其余河段水量损失较少。这主要由于研究河段属于变质岩系基岩峡谷,岩石坚硬且渗水能力差,“V”型河槽在一定程度上限制了洪水的跑滩。经实地考察发现,研究河段支沟在沟口处通常具有较大的比降,这束缚了特大洪水在行洪期间主河道洪水向支沟的回流与漫溢。此外,研究河段河道曲折且植被茂盛,再加上由于人工采砂使得河床崎岖不平,这势必会影响洪水的迅速下泄,致使水位抬高,从而淹没两岸的村庄和农田。

因此,在汉江上游的洪灾风险防范与防洪减灾对策的实施中,除加固两岸大堤之外要加强洪水的监测和预警,以便在洪水来临之前及时撤离高风险区内的人员和社会经济活动,这样才能最大限度的降低洪灾风险、减小灾害损失。

5　结 论

(1) 通过对近年来课题组古洪水研究成果的整理,发现汉江上游郧县段4个沉积剖面(YJP、SJH、GXHK、MTS) 均记录有1 000~900 a BP的北宋时期(960~1 127 CE)的古洪水事件;根据地层对比研究,4个沉积剖面顶层古洪水SWD极有可能记录北宋时期一次古洪水事件。

(2) 根据实测地形数据,基于HEC-RAS模型的恒定流模块(Steady flow)模拟了古洪水水面线。当模拟水位与调查水位达到最佳吻合时,古洪水洪峰流量的模拟值为57 500 $m^3\cdot s^{-1}$;此时,4个沉积剖面处的模拟水位误差介于-0.31%~0.34%之间。此外,采用2010年“7·18”洪水对模型的可靠性进行了验证;经计算,9处洪痕所指示的洪峰水位与模拟水位误差介于-0.18%~0.32%之间。这表明基于

HEC-RAS模型模拟的北宋古洪水水面线是合理的;同时也说明郧县段4个剖面顶层古洪水SWD极有可能记录北宋一次古洪水事件。

(3)采用非恒定流模块(Usteady flow)模拟了北宋古洪水的演进过程。结果表明,古洪水洪峰从YJP剖面演进到MTS剖面历时约1.15 h,在研究河段内洪峰流量削减了不足1%。根据可视化的模拟水深和流速发现,研究河段上游水深大于下游水深,而上游部分河段流速小于下游河段。此外,在汉江上游的洪灾风险防范中应加强洪水的监测和预警,以便在洪水来临之前及时撤离沿江两岸的洪灾高风险区。

(4)目前我国古洪水研究集中于单个沉积剖面、单个河流断面的古洪水水位和流量的重建,对于河段内多个沉积剖面共同记录的一次古洪水事件的研究却较少涉及,而采用水力学模型在长河段进行古洪水的演进模拟研究更为少见。因此,本文根据水文站实测洪水过程推求得到北宋古洪水的流量过程,基于HEC-RAS模型重建了长河段(19 km)内的古洪水淹没范围、水深与流速等;这不仅延长了汉江上游远年极值洪水数据,而且对于充分认识古洪水的水动力条件和沉积环境具有重要的科学意义。此外,可视化的淹没范围、水深及流速等要素为流域内的防洪减灾、洪灾风险评价提供了基础数据。

参考文献(References)

[1] 张国宏,张冬峰,赵永强,等. 气候变暖背景下山西区域地表干湿状况变化[J]. 干旱区地理,2020,43(2):281-289. [ZHANG Guohong, ZHANG Dongfeng, ZHAO Yongqiang, et al. Changes of dry/wet surfaces in Shanxi Province under global warming[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 281-289.

[2] 马爱华,岳大鹏,赵景波,等. 近60 a来内蒙古极端降水的时空变化及其影响[J]. 干旱区研究,2020,37(1):74-85. [MA Aihua, YUE Dapeng, ZHAO Jingbo, et al. Spatiotemporal variation and effect of extreme precipitation in Inner Mongolia in recent 60 years[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 74-85.]

[3] 殷淑燕,黄春长. 汉江上游近50 a来降水变化与暴雨洪水发生规律[J]. 水土保持通报,2012,32(1):19-25. [YIN Shuyan, HUANG Chunchang. Precipitation change and occurrence of rainstorms and floods in upper reaches of Hanjiang River during last 50 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 19-25.]

[4] BAKER V R. Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects[J]. Geomorphology, 2008, 101(1-2): 1-13.

[5] THORNDYCRAFT V R, BENITO G. The Holocene fluvial chronology of Spain: Evidence from a newly compiled radiocarbon database[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(3-4): 223-234.

[6] SHEFFER N A, RICO M, ENZEL Y, et al. The palaeoflood record of the Gardon River, France: A comparison with the extreme 2002 flood event[J]. Geomorphology, 2008, 98(1-2): 71-83.

[7] 葛兆帅,杨达源,李徐生,等. 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录[J]. 第四纪研究,2004,24(5):555-560. [GE Zhaoshuai, YANG Dayuan, LI Xusheng, et al. The paleoflooding record along the up reaches of the Changjiang River since the late pleistocene epoch[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 555-560.]

[8] 王兆夺,黄春长,查小春,等. 淮河上游卢庄段全新世古洪水水文恢复研究[J]. 干旱区地理,2018,41(2):325-333. [WANG Zhaoduo, HUANG Chunchang, ZHA Xiaochun, et al. Palaeoflood sedimentological and hydrological study of the Luzhuang section in the upper reaches of Huaihe River[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 325-333.]

[9] 李晓刚,黄春长,庞奖励. 无定河下游全新世古洪水研究[J]. 干旱区地理,2020,43(2):380-387. [LI Xiaogang, HUANG Chunchang, PANG Jiangli. Palaeoflood events in the lower reaches of the Wudinghe River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 380-387.

[10] 吉琳,庞奖励,黄春长,等. 汉江上游晏家棚段全新世古洪水研究[J]. 地球科学进展,2015,30(4):487-494. [JI Lin, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Holocene palaeoflood studies of the Yanjiapeng reach in the upper Hanjiang River, China[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(4): 487-494.]

[11] 刘建芳,查小春,黄春长,等. 汉江上游郧县尚家河段全新世古洪水水文学研究[J]. 水土保持学报,2013,27(2):90-94. [LIU Jianfang, ZHA Xiaochun, HUANG Chunchang, et al. Palaeoflood hydrological study in the Yun County reach in the upper reaches of the Hanjiang River[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2013, 27(2): 90-94.]

[12] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等. 汉江上游郧西段归仙河口剖面全新世古洪水事件研究[J]. 水土保持学报,2014,28(2):306-312. [MAO Peini, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. The Holocene palaeoflood events at the Guixianhekou site in the Yunxi reach of the upper Hanjiang River[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2014, 28(2): 306-312.]

[13] 郑树伟,庞奖励,黄春长,等. 湖北弥陀寺汉江段北宋古洪水研究[J]. 自然灾害学报,2015,(3):153-160. [ZHENG Shuwei, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Study on palaeoflood in Northern Song period at Mituosi segment of Hanjiang River, Hubei Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, (3): 153-160.]

[14] 靳俊芳,殷淑燕,王学佳,等. 汉江上游北宋洪水事件的沉积记录和文献记录对比[J]. 山地学报,2016,34(3):266-273. [JIN Junfang, YIN Shuyan, WANG Xuejia, et al. Comparison of extraordinary flood events reflected selected by sediments with historical documents in the upper reaches of the Hanjiang River during the Chinese Northern Song Dynasty (950-1050 A D)[J]. Mountain Research, 2016, 34(3): 266-273.]

[15] 刘嘉慧. 汉江上游北宋特大历史洪水考证研究[D]. 西安:陕西师范大学,2017. [LIU Jiahui. Textual research on the extraordinary historical flood in Northern Song Dynasty in the upper reaches of Hanjiang River[D]. Xi'an:Shaanxi Normal University,2017.]

[16] 杨永德,邹宁,郭希望. 汉江白河水文站设计洪水分析计算[J]. 水资源研究,1997,(3):36-38. [YANG Yongde, ZOU Ning, GUO Xiwang. Design flood analysis and calculation of Baihe hydrological station on Hanjiang River[J]. Journal of Water Resources Research,1997,(3):36-38.]

[17] 李文浩. 汉江上游流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(2):54-58. [LI Wenhao. Hydrologic characteristics analysis in the upper reaches of Hanjiang River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2004,15(2):54-58.]

[18] 李庆宝. 安康致洪暴雨的环流特征分析[J]. 陕西气象,1991,(5):10-14. [LI Qingbao. Analysis of circulation characteristics of flood-causing rainstorm in Ankang[J]. Journal of Shaanxi Meteorology,1991,(5):10-14.]

[19] 李庆宝. 汉江上游十大洪水气象特征分析[J]. 灾害学,1991,(2):43-48. [LI Qingbao. Meteorological characters of the ten floods in upper reaches of Hanjiang River[J]. Journal of Catastrophology,1991,(2):43-48.]

[20] 何长春. 汉江上游地区特大暴雨洪水的若干问题初探[J]. 陕西水利,1985,(1):43-50. [HE Changchun. Preliminary study on some problems of extraordinary storm flood in the upper reaches of Hanjiang River[J]. Shaanxi Water Resources,1985,(1):43-50.]

[21] 王学琪. 汉江上游流域暴雨洪水特征[J]. 陕西水利,1988,(1):28-35. [WANG Xueqi. Characteristics of rainstorm and flood in upper reaches of Hanjiang River[J]. Shaanxi Water Resources,1988,(1):28-35.]

[22] 张楷. 汉江上游暴雨洪水特性研究[J]. 灾害学,2006,21(3):98-102. [ZHANG Kai. Analyses of rainstorm and flood characteristics in the upper reaches of Hanjiang River[J]. Journal of Catastrophology,2006, 21(3):98-102.]

[23] 党红梅,周义兵,李定安,等. 汉江流域致灾暴雨的天气学分析[J]. 陕西气象,2011,(5):14-17. [DANG Hongmei, ZHOU Yibing, LI Ding'an, et al. Synoptic analysis caused by disaster rainstorm in upper reaches of Hangjiang River[J]. Journal of Shaanxi Meteorology,2011,(5):14-17.]

[24] 胡明思,骆承政. 中国历史大洪水[M]. 北京:中国书店,1989:147-158. [HU Mingsi, LUO Chengzheng. China's historical large floods[M]. Beijing: China Bookshop Press, 1989: 147-158.]

[25] BAKER V R. Palaeoflood hydrology in a global context[J]. Catena,2006,66(1):161-168.

[26] 温克刚. 中国气象灾害大典(陕西卷)[M]. 北京:气象出版社,2005:44. [WEN Kegang. The ceremeny Chinese meteorological disasters (Shaanxi volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press,2005:44.]

[27] GARY W. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual[R]. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA., 2016.

[28] ALHO P, BAKER V R, SMITH L N. Paleohydraulic reconstruction of the largest Glacial Lake Missoula draining (S)[J]. Quaternary Science Reviews,2010,29(23):3067-3078.

[29] 张行南,彭顺风. 平原区河段洪水演进模拟系统研究与应用[J]. 水利学报,2010,41(7):803-809. [ZHANG Xingnan, PENG Shunfeng. Combined simulation system for propagation of flood in plain rivers and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(7):803-809.]

[30] 王佰伟,田富强,胡和平. 三峡区间入流对三峡库区洪峰的影响分析[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(7):981-991. [WANG Baiwei, TIAN Fuqiang, HU Heping. Analysis of the effect of regional lateral inflow on the flood peak of the Three Gorges Reservoir[J]. Science China Technological Sciences, 2011,41(7):981-991.]

[31] 朱震达. 汉江上游丹江口至白河间的河谷地貌[J]. 地理学报,1955,21(3):259-270. [CHU Zhenda. The valley form of the upper Han River, from Pai-ho to Tan-chiang-kou[J]. Acta Geographica Sinica,1955,21(3):259-270.]

[32] 武汉水利电力学院水力学教研室. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社,1986:335-336. [Department of Hydraulics, Wuhan Institute of Water Conservancy and Electricity. Hydraulics[M]. Beijing: Higher Education Press,1986:335-336.]

[33] 黄春长,庞奖励,查小春,等. 黄河流域关中盆地史前大洪水研究——以周原漆水河谷地为例[J]. 中国科学:(地球科学),2011,41(11):1658-1669. [HUANG Chunchang, PANG Jiangli, ZHA Xiaochun, et al. Prehistorical floods in the Guanzhong Basin in the Yellow River drainage area: A case study along the Qishuihe River Valley over the Zhouyuan Loess Tableland[J]. Scientia Sinica(Terrae),2011,41(11):1658-1669.]

[34] WAN H, HUANG C, PANG J. Major elements in the Holocene loess-paleosol sequence in the upper reaches of the Weihe River Valley, China[J]. Journal of Arid Land,2016,8(2):197-206.

[35] BENITO G, THORNDYCRAFT V R. Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences[J]. Journal of Hydrology,2005,313(1-2):3-15.

[36] BENITO G, LANG M, BARRIENDOS M, et al. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. review of scientific methods[J]. Natural Hazards,2004,31(3):623-643.

[37] RAFF D. Appropriate application of paleoflood information for the hydrology and hydraulics decisions of the US Army Corps of Engineers[R]. USA: US Crops of Engineers,2013.

[38] 冯宝飞,高袁,陈瑜彬,等. 丹江口水库"10·07"洪水水文气象耦合预报调度[J]. 人民长江,2011,42(6):41-44. [FENG Baofei, GAO Yuan, CHEN Yubin, et al. Coupling technology of hydrology and meteorology for forecast and regulation of flood of Danjiangkou Reservoir in July, 2010[J]. Yangtze River, 2011,42(6):41-44.]

[39] 沈桂环,李军社. 汉江上游"2010·7"特大暴雨洪水分析[J]. 甘肃科技纵横,2011,40(3):66-67. [SHEN Guihuan, LI Junshe. Analysis of the extraordinary storm flood in the upper reaches of Hanjiang River in July 2010[J]. Scientific & Technical Information of Gansu,2011,40(3):66-67.]

Palaeoflood research in Yunxian section of the upper reaches of Hanjiang River in the Northern Song Dynasty

WANG Guang-peng, ZHA Xiao-chun, HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, ZHANG Guo-fang
(*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710119, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: Paleoflood research is a frontier science in the field of global change research. Currently, paleoflood hydrology research focuses on the reconstruction of water level and discharge based on a single sediment profile. However, few simulation studies of paleoflood events were conducted based on multiple sedimentary profiles of long-reach areas. In this study, a paleoflood event that took place during the Northern Song Dynasty was studied based on four sedimentary profiles of the Yunxian reach of Hanjiang River, Hubei Province, China, i.e., Yanjiapeng (YJP), Shangjiahe (SJH), Guixianhekou (GXHK), and Mituosi (MTS) profiles. In addition, a paleoflood hydrology investigation on the river sections, where the four sedimentary profiles are located, was conducted based on the measured terrain data and hydrological parameters. The water surface profile and peak discharge (Q = 57 500 $m^3 \cdot s^{-1}$) of the paleoflood event that occurred during the Northern Song Dynasty were reconstructed. The simulated water-level errors within the four sedimentary profiles were between −0.31 % and 0.34 %, which confirms the water surface simulated with the HEC-RAS model. Furthermore, a paleoflood flow process was designed based on the typical flood process measured in the hydrological station. Subsequently, the paleoflood routing in the Northern Song Dynasty was simulated based on the unsteady flow modeling using the HEC-RAS model. The results indicated that the paleoflood peak from the YJP to the MTS profiles lasted about 1.15 h, and the loss in the flood-peak discharge was less than 1%. The water depth measured upstream was found to be greater than that measured downstream, whereas the flow velocity showed opposite results. Based on the inundation area, it can be concluded that the high-risk areas for flooding in the study reach are mainly located near the banks of the Hanjiang River, which is mainly affected by the bedrock canyon. This study has a considerable scientific significance because it help understand the catastrophic flood movements within the upper reaches of the Hanjiang River, as it provides essential data for flood design, forecasting, and prevention as well as disaster mitigation within the basin.

Key words: palaeoflood research; Northern Song Dynasty; HEC-RAS model; flood prevention and mitigation; upper reaches of Hanjiang River